



**Europäisches
Patentamt**

**European
Patent Office**

**Office européen
des brevets**

Bescheinigung

Certificate

Attestation

Die angehefteten Unterlagen stimmen mit der ursprünglich eingereichten Fassung der auf dem nächsten Blatt bezeichneten europäischen Patentanmeldung überein.

The attached documents are exact copies of the European patent application described on the following page, as originally filed.

Les documents fixés à cette attestation sont conformes à la version initialement déposée de la demande de brevet européen spécifiée à la page suivante.

Patentanmeldung Nr. Patent application No. Demande de brevet n°

03405303.3

Der Präsident des Europäischen Patentamts;
Im Auftrag

For the President of the European Patent Office

Le Président de l'Office européen des brevets
p.o.

R C van Dijk

THIS PAGE BLANK (USPTO)



Anmeldung Nr:
Application no.: 03405303.3
Demande no:

Anmeldetag:
Date of filing: 30.04.03.
Date de dépôt:

Anmelder/Applicant(s)/Demandeur(s):

Sulzer Markets and Technology AG
Zürcherstrasse 12
8401 Winterthur
SUISSE

Bezeichnung der Erfindung/Title of the invention/Titre de l'invention:
(Falls die Bezeichnung der Erfindung nicht angegeben ist, siehe Beschreibung.
If no title is shown please refer to the description.
Si aucun titre n'est indiqué se référer à la description.)

Verfahren zum Visualisieren eines räumlich aufgelösten Datensatzes unter
Verwendung eines Beleuchtungsmodells

In Anspruch genommene Priorität(en) / Priority(ies) claimed /Priorité(s)
revendiquée(s)
Staat/Tag/Aktenzeichen/State/Date/File no./Pays/Date/Numéro de dépôt:

Internationale Patentklassifikation/International Patent Classification/
Classification internationale des brevets:

G06T7/00

Am Anmeldetag benannte Vertragsstaaten/Contracting states designated at date of
filing/Etats contractants désignées lors du dépôt:

AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HU IE IT LU MC NL
PT RO SE SI SK TR LI

THIS PAGE BLANK (USPTO)

5 **Sulzer Markets and Technology AG, CH-8401 Winterthur, Schweiz**

Verfahren zum Visualisieren eines räumlich aufgelösten Datensatzes unter Verwendung eines Beleuchtungsmodells

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Visualisieren eines räumlich
10 aufgelösten Datensatzes unter Verwendung eines Beleuchtungsmodells,
sowie die Verwendung dieses Verfahrens zum Generieren dreidimensionaler
Darstellungen eines Körpers gemäss dem Oberbegriff des unabhängigen
Anspruchs der jeweiligen Kategorie.

Zur Darstellung von drei- und höherdimensionalen Datensätzen bedient man
15 sich häufig zweidimensionaler Projektionen dieser Volumina oder
Hypervolumina, welche dann graphisch ausgegeben und vom Betrachter
interpretiert werden können. Für den durchaus häufigen Fall, dass das
Volumen in kartesischer bzw. isotroper Form vorliegt, und damit die Volumen
in einem orthogonalen Raster angeordnet sind, das in allen drei
20 Raumrichtungen dieselbe Auflösung besitzt, verfügen viele
Grafikbeschleuniger moderner Datenverarbeitungsanlagen über Hardware,
die sich unmittelbar effizient nutzen lässt, um die Volumenvisualisierung
durchzuführen. Eine solche Ausstattung mit Grafikbeschleunigern in Form von

Grafikkarten ist auch bei handelsüblichen Personalcomputern inzwischen durchgängiger Standard.

- Die Visualisierung räumlich aufgelöster Datensätze durch dreidimensionale bildliche Darstellungen, beispielsweise in einer Ebene, gewinnt dabei auf
- 5 vielen technischen Gebieten zunehmend an Bedeutung. Das betrifft sowohl Animationen, beispielsweise bei Computerspielen oder in der Werbung, als auch den industriellen Bereich und insbesondere die moderne medizinische Diagnostik und Therapie. Hier sind zahlreiche bildgebende
- 10 Untersuchungsmethoden, wie unter anderen die Computertomographie, die Kernspintomographie oder Verfahren der Ultraschalltechnik bekannt, die, anhand von messtechnisch erfassten Datensätzen, Darstellungen von bestimmten Bereichen des menschlichen Körpers, von Organen, dem inneren von Blutgefässen oder dem Herzen, des menschlichen Schädels usw. geben sollen. Dabei kommt es zunehmend darauf an, sowohl im wesentlichen
- 15 statische Abbildungen, als auch bewegte Vorgänge möglichst in Echtzeit abzubilden. Das ist zum Beispiel bei der Beobachtung der Bewegung des Herzens mittels eines Katheters oder wenn eine entsprechende Messsonde, z.B. eine Ultraschallsonde, bei einer Operation das Auge des Arztes ersetzen muss, von zentraler Bedeutung. Verwandte bildgebende Verfahren sind
- 20 natürlich auch aus der industriellen Technik, beispielsweise zur zerstörungsfreien Überprüfung sicherheitsrelevanter Komponenten wie Rad- und Achssätze bei Schienenfahrzeugen, Druckbehältern, Rohren und dünnen Leitungen, z.B. in der Kraftwerkstechnik und in vielen anderen Bereichen mehr wohlbekannt.
- 25 Darüber hinaus gewinnt die Visualisierung räumlich aufgelöster Datensätze durch dreidimensionale bildliche Darstellungen, insbesondere von Radardaten, Sonardaten (Ortung und Navigation), von seismischen Datensätzen, von Wetterdaten oder beispielsweise die Visualisierung im Rahmen von Finite Elemente Analysen eine immer grössere Bedeutung. Aber

auch für Computersimulationen auf den verschiedensten Gebieten, unter anderem im Bereich der Radar-, Ultraschall- und Sonartechnik gibt es zahllose Anwendungen.

Zunehmend wird auch auf eine immer realistischere Darstellung der
5 messtechnisch erfassten und dann projizierten Datensätze Wert gelegt. Das
heisst, dass die Tendenz hin zu immer höherer räumlicher Auflösung des zu
beobachtenden Objekts geht, wobei es darauf ankommt, den durch eine
Messapparatur erfassten, in der Regel dreidimensionalen Datensatz
10 perspektivisch korrekt, beispielsweise auf die zweidimensionale Oberfläche
eines Computermonitors zu projizieren, und dem projizierten Volumen in
realistischer Weise Lichtreflexe einzuschreiben, um den menschlichen Visus
bei der Orientierung in der räumlichen Tiefe in einem dreidimensionalen
graphischen Datensatz zu unterstützen. Insbesondere bei stereoskopischen
15 Projektionen, wenn also dem menschlichen Visus durch Überlagerung von
zwei in der Perspektive leicht gedrehte Projektionen durch eine geeignete
Projektionseinrichtung ein dreidimensionales Bild vermittelt werden soll, ist die
Einbeschreibung von Beleuchtungseffekten in die Projektion von besonderer
Bedeutung.

Dazu wird ein bestimmtes Beleuchtungsmodell zugrunde gelegt, dass durch
20 sogenannte Beleuchtungsfunktionen beschrieben wird, die die
Wechselwirkung von (virtuell) eingestrahlttem Licht mit den Objekten im
Volumen, einschliesslich Dämpfung, Reflexion und Streuung approximieren.
Es liegt auf der Hand, dass dazu enorme Rechenleistungen erforderlich sind,
die ohne weiteres auch nicht von den heutzutage auf dem Markt verfügbaren
25 Rechnersystemen erbracht werden.

Das aus dem Stand der Technik bekannte Prinzip der Visualisierung
mehrdimensionaler graphischer Datensätze mit Hilfe handelsüblicher
Graphikhardware unter Berücksichtigung eines bestimmten

Beleuchtungsmodells soll im folgenden unter Bezugnahme auf die Fig. 1 bis 3 kurz skizziert werden. Zur Unterscheidung des Stands der Technik von dem erfindungsgemässen Verfahren sind in den Fig. 1 bis 3 die Bezugszeichen mit einem Hochkomma versehen. All den aus dem Stand der Technik bekannten

5 Prinzipien zur Visualisierung von Datensätzen D' , die Daten $D'(\alpha', \beta', \gamma')$ (gemessen in einem Messkoordinatensystem K'_m mit Koordinatenachsen α', β', γ' umfassen, ist gemeinsam, dass die Beleuchtungsfunktionen, die das Beleuchtungsmodell definieren, im Projektionsraum P' ausgewertet werden, da dort natürlich der Sehvektor S' des Beobachters bzw. der

10 Beleuchtungsvektor definiert ist. Im Rahmen dieser Anmeldung wird der Vorgang des Berechnens der Beleuchtungsfunktionen in Anlehnung an die Nomenklatur der einschlägigen Literatur als "Shading" bezeichnet. Davon zu unterscheiden ist der im Rahmen dieser Anmeldung als "Rendern" bezeichnete Vorgang. Unter Rendern soll im folgenden die Linearisierung

15 nach Schneiden in einem Originalvolumen bzw. in einem gemessenen Datensatz und das anschliessende Übersetzen der Schnittpunkte in die Geometrie eines Projektionsraumes verstanden werden.

In einem einfachen Fall liegt, wie in Fig. 1 an einem bekannten Beispiel aus dem Stand der Technik schematisch dargestellt, der zu visualisierende

20 Datensatz D' , der durch eine entsprechende Vorschrift oder eine Messvorrichtung $1'$, wie beispielsweise durch einen Kernspintomographen $1'$ durch Messung in einem Originalvolumen G_o' generiert wurde, in karthesischer oder isotroper Form vor. Das Originalvolumen G_o' hat die Form eines Quaders und die Volumenelemente V' sind in einem orthogonalen

25 Raster angeordnet, das in allen drei Raumachsen α', β', γ' des Messkoordinatensystem K'_m dieselbe Auflösung besitzt. Zur Projektion eines solchen Datensatzes D' , beispielsweise auf einem Beobachtungsmonitor $2'$, wird der Datensatzes D' in eine Datenverarbeitungsanlage $3'$ geladen. Diese verfügt über handelsübliche Graphikbeschleuniger, die Graphikhardware $4'$

umfassen, welche sich effizient nutzen lässt, um die Volumenvisualisierung auszuführen.

Hierfür findet häufig das Konzept der Textur Verwendung, wobei die Textur durch einen Datensatz definiert ist, aus dem zweidimensionale polygonale
5 Flächen herauskopiert, also herausgelesen werden können, was der oben erwähnten graphischen Schneideoperation entspricht.

Dazu wird, wie in Fig. 2 schematisch gezeigt, bei der Abbildung eines digitalen Bildes $5'$ aus dem Originalvolumen G_o' , d.h. aus einem digitalen Datensatz D' , ein beliebiges Polygon auf ein anderes Polygon E_p' im Projektionsraum P' abgebildet, wobei das Polygon T_p' des Originalvolumens G_o' geometrisch
10 nicht ähnlich zu dem Polygon E_p' im Projektionsraum P' zu sein braucht. Wird wie im vorliegenden Beispiel ein Originalvolumen G_o' durch einen dreidimensionalen Datensatz D' , der aus einer oder mehreren 2D- oder 3D-Texturen T_p' aufgebaut ist, repräsentiert, so wird ein solcher
15 dreidimensionaler Datensatz D' häufig auch als 3D-Textur bezeichnet.

Es versteht sich, dass in einem besonders einfachen Fall die Textur T_p' identisch mit dem Polygon aus der Schneideoperation sein kann.

Das Originalvolumen G_o' , also der Datensatz D' , wird beispielsweise senkrecht zu einer Betrachtungsrichtung B' eines (virtuellen) Betrachters $6'$, in
20 eine bestimmte Zahl von Texturen T_p' unterteilt, deren Ecken dann in die Betrachtungsposition gedreht, perspektivisch entzerrt und dargestellt werden. Diese Darstellung des Originalvolumens G_o' als zweidimensionale Projektion wird durch wiederholtes "Schneiden" des Originalvolumens G_o' , d.h. des dreidimensionalen Datensatzes D' senkrecht zur Betrachtungsrichtung $6'$
25 erreicht. Das Schneiden besteht dabei darin, dass die Werte aus dem Datensatz D' interpoliert und in eine Projektionsebene, die in dem vorliegenden Fall mit dem Projektionsraum P' identisch ist, projiziert werden.

Die Menge der Schnitte, die hier zweidimensionale Bilder sind, müssen dann durch eine Integrationsvorschrift zu einem einzigen Bild $5'$ zusammengefügt werden. Die Integrationsvorschrift kann dabei eine simple punktweise Summation sein, oder durch eine bestimmte Vorschrift, die oft auch als Beleuchtungsfunktion bezeichnet wird, im Rahmen eines sogenannten Beleuchtungsmodells erfolgen. Die Beleuchtungsfunktionen, bzw. die Beleuchtungsmodelle berücksichtigen also durch den Vorgang des Shadings approximativ die Wechselwirkung von (real oder virtuell) eingestrahltm Licht, einschliesslich Dämpfung, Reflexion und Streuung, mit den Objekten des Originalvolumens G_o' , also dem dreidimensionalen Datensatz D' .

Soll eine stereoskopische Projektion erreicht werden, muss das zuvor geschilderte Verfahren zusätzlich noch in Bezug auf mindestens einen zweiten Sehvektor, dessen Richtung vom Sehvektor S' leicht verschieden ist, durchgeführt und einer geeigneten stereoskopischen Projektionseinrichtung zugeführt werden. D.h., für jedes Auge muss entsprechend seiner Position eine Ansicht berechnet werden.

Die Literatur der Volumenvisualisierung kennt dabei zahlreiche Ansätze, wie einem zu visualisierenden Datensatz D' optische Eigenschaften zugeschrieben werden können. Die bekannteste Klasse solcher Verfahren betrachtet die Intensität als eine Form der optischen Dichte, so dass Dichteschwankungen Lichtstreuung und Reflexion verursachen und die Dichte selbst lichtabsorbierend wird. In der Literatur werden Algorithmen, die auf dieser Hypothese beruhen, pauschal als Gradientenrenderer bezeichnet.

Natürlicherweise wertet man die Beleuchtungsfunktionen im Projektionsraum P' aus, da dort der Sehvektor S' und der Beleuchtungsvektor definiert sind. Das heisst, das Originalvolumen G_o' (also der Datensatz D') wird zunächst in Ebenen geschnitten, d.h. in Texturen $T_{p'}$ zerlegt, und in den Projektionsraum P' abgebildet, ein Vorgang der auch als Texturremapping in der Literatur

bezeichnet wird. Anschliessend werden im Projektionsraum P' die Beleuchtungsfunktionen ausgewertet, das heisst, auf die projizierten (also gedrehten und entzerrten) Texturen T_p' im Projektionsraum P' angewendet.

5 Dieses aus dem Stand der Technik bekannte Verfahren ist einerseits deshalb nachteilig, weil der Sehvektor S' bzw. der Beleuchtungsvektor weder auf den ebenen Texturen T_p' des Originalvolumens G_o' noch auf den projizierten Ebenen E_p' im Projektionsraum P' einen konstanten Betrag haben; vielmehr ist der Betrag des Sehvektors, wie im linken Bild von Fig. 3 schematisch dargestellt, auf Kugelschalen K' konstant. Somit ändert sich der Sehvektor S' und der Beleuchtungsvektor im allgemeinen über einen Schnitt, d.h. über eine
10 ebene Textur T_p' bzw. über eine Ebene E_p' im Projektionsraum P' .

Daher bilden die Ebenen, die durch Sehvektoren S' mit konstantem Betrag gekennzeichnet sind, im Originalvolumen G_o konzentrische Kugelschalen K' . Weil somit betragsmässige Änderungen des Sehvektors S' nicht linear von
15 den Texturkoordinaten der Texturen T_p' , bzw. der projizierten Ebenen E_p' abhängen, können diese auch nicht auf der Graphikhardware 4' unmittelbar kodiert werden. Daher muss bei den aus dem Stand der Technik bekannten Verfahren die projizierte Ebene E_p' im Projektionsraum P' , wie im rechten Bild der Fig. 3 schematisch dargestellt, in kleinere Flächen zerlegt werden, wobei
20 zwischen den Eckpunkten der Teilflächen linear interpoliert wird.

Neben verschiedenen Nachteilen, wie Erhöhung der benötigten Rechenzeit, liegt ein besonders gravierender Nachteil darin, dass durch die zuvor beschriebene Interpolation im Projektionsraum P' zwangsläufig Linearisierungsfehler auftauchen.

25 Während die zuvor erwähnten Linearisierungsfehler bei der Abbildung eines im wesentlichen karthesischen und isotropen Originalvolumens G_o' , also eines karthesischen Datensatzes D' , sich in manchen Fällen noch in einem

vertretbaren Rahmen bewegen, werden die Linearisierungsfehler bei nicht
karthesischen Datensätzen D' unvertretbar hoch, so dass entweder keine
brauchbare Abbildung im Projektionsraum P' entsteht oder der
Rechenaufwand steigt so dramatisch an, dass Echtzeitabbildungen, wie sie
5 beispielsweise in der medizinischen Technik häufig unerlässlich sind, mit den
aus dem Stand der Technik bekannten Projektionsverfahren und der derzeitig
verfügbaren Hardware nicht mehr möglich sind. Es versteht sich, dass durch
eine zusätzliche Auswertung der Beleuchtungsfunktionen im Projektionsraum
 P' der Rechenaufwand nochmals dramatisch steigt und bei stereoskopischer
10 Projektion noch weiter erhöht wird.

Dabei liegen gerade bei vielen für die Praxis wichtigen Anwendungen die
Datensätze D' , die im Originalvolumen G_o' gewonnen wurden, eben nicht in
karthesischen, d.h. in rechtwinkligen Koordinaten vor. Das hat seine Ursache
in erster Linie in der Art der Datenaquisition. Typische Beispiele sind die
15 (Röntgen) Computertomography oder spezielle Ultraschalltechniken, bei
welchen die zu projizierenden Datensätze D' beispielsweise in
Zylinderkoordinaten vorliegen. Bei der Verwendung sehr moderner
Abtastsysteme ist somit die relativ lange Zeit, die zur Erstellung einer
dreidimensionalen Abbildung im Projektionsraum P' mit den bekannten
20 Verfahren aus dem Stand der Technik benötigt wird, weniger durch die
Datenaquisition als solche, also die Erstellung des Datensatzes D' an sich
verursacht, sondern vielmehr durch den Vorgang der Visualisierung des
Datensatzes D' . So sind bereits sehr schnell abtastende Ultraschallsonden
bekannt, mit denen ein interessierendes Originalvolumen G_o' in mehreren
25 Ebenen gleichzeitig und kreisförmig abgetastet wird. Solche Ultraschallsonden
umfassen beispielsweise mehrere, um eine Achse schwenkbare oder
rotierbare, linear oder allgemein in einem Array angeordnete
Ultraschallwandler, von denen einige oder alle parallel betrieben werden, so
dass ein gleichzeitiges zylindersymmetrisches Abtasten in mehreren Ebenen
30 simultan ermöglicht wird. Sehr häufig sind solche schnell abtastenden

Untraschallsonden allein schon aus Effizienzgründen nicht in der Lage, das Volumen karthesisch zu vermessen.

Die so gewonnen Datensätze D' liegen somit in einer Zylindersymmetrie vor und können nicht unmittelbar auf herkömmlich verfügbarer Graphikhardware
5 kodiert werden. Wenn eine schnelle Visualisierung der Datensätze D' notwendig ist, um beispielsweise eine Echtzeitdarstellung bei Videofrequenzen mit typischen Bildlaufzeiten von weniger als $1/25$ Sekunde zu erreichen, verbieten sich prinzipiell komplizierte und zeitaufwendige Rechenoperationen zur Aufbereitung der gemessenen Datensätze D' für die
10 Verarbeitung in der Graphikhardware 4'. Somit scheidet insbesondere eine aufwendige Koordinatentransformation in ein karthesisches Koordinatensystem aus.

Zur Lösung dieses Problems wird in der EP 1 059 612 A1 ein Verfahren zum Visualisieren eines räumlich aufgelösten Datensatzes D' angegeben, dass es
15 durch Vermeidung aufwendiger Teilschritte auf besonders effiziente Weise erlaubt, auch nicht karthesische Datensätze D' auf allgemein verfügbarer Graphikhardware 4', wie sie beispielsweise in handelsüblichen Personalcomputern zum Einsatz kommt, enorm schnell zu verarbeiten und so dreidimensionale Darstellungen, selbst von bewegten Objekten, in Echtzeit,
20 d.h. bei typischen Videofrequenzen, zu projizieren und darzustellen. Das vorgenannte Verfahren ist in der EP 1 059 612 A1, deren Inhalt hiermit in diese Anmeldung aufgenommen wird, eingehend beschrieben und braucht daher nicht mehr im Detail erläutert zu werden.

Das in der EP 1 059 612 A1 vorgeschlagene Verfahren erlaubt es zwar auf
25 besonders elegante und effiziente Weise mehrdimensionale Datensätze D' , die in beliebigen krummlinigen Koordinaten, z.B. in Zylinder- oder Kugelsymmetrie vorliegen, ohne grossen Rechenaufwand und enorm schnell auf gewöhnlicher Graphikhardware unmittelbar zu kodieren. Das Problem der

schnellen und effizienten Auswertung der Beleuchtungsfunktionen bleibt jedoch unberührt.

Ausgehend von diesem Stand der Technik ist es daher eine Aufgabe der Erfindung, ein Verfahren zum Visualisieren eines räumlich aufgelösten Datensatzes bereitzustellen, das es auf besonders effiziente Art erlaubt die
5 Beleuchtungsfunktionen auszuwerten, wobei die benötigte Rechenzeit im Vergleich zu Verfahren aus dem Stand der Technik enorm reduziert wird.

Die diese Aufgabe lösenden Gegenstände der Erfindung sind durch die Merkmale des unabhängigen Anspruchs der jeweiligen Kategorie
10 gekennzeichnet.

Die abhängigen Ansprüche beziehen sich auf besonders vorteilhafte Ausführungsformen der Erfindung.

Erfindungsgemäss wird somit ein Verfahren zum Visualisieren eines räumlich aufgelösten Datensatzes unter Verwendung eines Beleuchtungsmodells
15 vorgeschlagen, wobei ein Datum des Datensatzes jeweils einem Volumenelement zugeordnet ist, dessen Lage durch Koordinaten in einem Messkoordinatensystem beschrieben wird. Die Daten werden als mindestens eine Textur in eine Grafikhardware geladen, um in einem Projektionsraum eine bildliche Darstellung zu erzeugen. Dabei wird das Beleuchtungsmodell im
20 Messkoordinatensystem ausgewertet.

Wesentlich für die Erfindung ist es somit, dass ein für die Visualisierung des Datensatzes zugrunde gelegtes Beleuchtungsmodell bzw. die das Beleuchtungsmodell definierenden Beleuchtungsfunktionen im Messkoordinatensystem des Originalvolumens ausgewertet werden. Das
25 heisst, der Vorgang des Shadings findet vollständig im Originalvolumen statt und ist vom Vorgang des Renderns, wie er eingangs definiert wurde, vollständig getrennt.

Bevorzugt werden dabei die Daten des Datensatzes, die in einer Messung, beispielsweise einer Messung mittels einer Ultraschallsonde am Herzen, generiert wurden, ohne Transformation aus dem Messkoordinatensystem in ein anderes Koordinatensystem, insbesondere ohne Transformation in ein

5 karthesisches und / oder isotropes Koordinatensystem, verarbeitet. Das heisst, bei Anwendung des erfindungsgemässen Verfahrens, bei welchem die Beleuchtungsfunktionen im Messkoordinatensystem ausgewertet werden, werden die Daten durch elementare Rechenoperationen so aufbereitet, dass sie ohne Koordinatentransformation in die Grafikhardware geladen und von

10 dieser verarbeitet werden können.

Bevorzugt kommt das erfindungsgemässe Verfahren in einer Ausführungsvariante zum Einsatz, bei dem das Messkoordinatensystem ein nicht-kartesisches Messkoordinatensystem ist. Im speziellen kann das Messkoordinatensystem ein Zylinder- oder Kugelkoordinatensystem oder ein

15 anderes nicht-kartesisches Koordinatensystem sein. So können die Daten beispielsweise mittels einer sehr schnell abtastenden, rotierenden Ultraschallsonde generiert werden. Mit solchen Ultraschallsonden ist es möglich ein interessierendes Originalvolumen, beispielsweise das Innere eines menschlichen Herzens, in mehreren Ebenen gleichzeitig und

20 kreisförmig abzutasten. Solche Ultraschallsonden können mehrere, um eine Achse schwenkbare oder rotierbare, linear oder allgemein in einem Array angeordnete Ultraschallwandler umfassen, von denen einige parallel betrieben werden, so dass ein gleichzeitiges zylindersymmetrisches Abtasten in mehreren Ebenen ermöglicht wird. Somit besitzt das

25 Messkoordinatensystem, in dem die Daten des Datensatzes vorliegen, ebenfalls Zylindersymmetrie.

Es versteht sich, dass das erfindungsgemässe Verfahren in einer speziellen Ausführungsvariante auch vorteilhaft auf Daten eines kartesischen Datensatzes angewendet werden kann. Somit ist das erfindungsgemässe

Verfahren keineswegs auf nicht-karthesische Messkoordinatensysteme beschränkt.

In einem für die Praxis wichtigen Ausführungsbeispiel des erfindungsgemässen Verfahrens, wird zwischen den Daten des Datensatzes
5 im Messkoordinatensystem linear interpoliert. Dadurch können die Daten ohne Durchführung einer Koordinatentransformation in ein karthesisches System in die Grafikhardware geladen und von dieser verarbeitet werden.

Nicht zuletzt dadurch, dass die Daten des Messdatensatzes, die in einem krummlinigen, nicht-karthesischen Messkoordinatensystem vorliegen können,
10 beispielweise in Zylinderkoordinaten oder in Kugelkoordinaten, in einer für die Praxis sehr wichtigen Ausführungsvariante des erfindungsgemässen Verfahrens ohne vorherige Koordinatentransformation in die Grafikhardware geladen und von dieser verarbeitet werden können, können die Daten des Datensatzes auch nahe einer Singularität ausgewertet werden. Solche
15 Singularitäten findet man beispielsweise in Zylinderkoordinaten, die durch eine Koordinate, die einem Radius entspricht, eine Winkelkoordinate und eine weitere Raumkoordinate beschrieben werden können, bei einem Wert des Radius von Null. Das heisst unter der Aussage bei "Radius Null liegt eine Singularität vor" ist zu verstehen, dass die Daten in einem
20 Messkoordinatensystem mit Zylindersymmetrie in der Nähe bzw. exakt bei Punkten mit einem Wert der Radius-Koordinate von Null nicht durch eine Koordinatentransformation auswertbar sind. Da jedoch in der oben beschriebenen Ausführungsvariante keine Koordinatentransformation stattfindet, können durch Anwendung dieser Ausführungsvariante des
25 erfindungsgemässen Verfahrens auch Daten des Datensatzes nahe einer Singularität ausgewertet werden. Selbstverständlich ist das erfindungsgemässe Verfahren grundsätzlich auch anwendbar, wenn die Daten des Datensatzes, insbesondere zur Weiterverarbeitung in der Grafikhardware, einer Koordinatentransformation unterzogen werden.

Insbesondere können die Daten des Datensatzes in einer weiteren Variante des erfindungsgemässen Verfahrens eine volumenaufgelöste Abtastung eines Körpers, zum Beispiel eines Teils eines menschlichen Körpers repräsentieren, so dass die bildliche Darstellung eine dreidimensionale Volumendarstellung, insbesondere unter anderem auch eine semi-transparente Darstellung des Körpers ist. Solche Darstellungen sind unter anderem dann von Vorteil, wenn sich der Betrachter im Volumen des dargestellten Körpers orientieren muss und / oder wenn der Körper oder Teile des dargestellten Körpers gewissen Bewegungsabläufen unterliegt. So kann das Verfahren unter anderem zur Beobachtung eines schlagenden Herzens oder bei einer Operation am schlagenden Herzen, zum Beispiel unter Verwendung einer Ultraschallmesseinrichtung, besonders vorteilhaft eingesetzt werden. Da es durch Einsatz des erfindungsgemässen Verfahrens möglich ist, enorm schnell dreidimensionale Darstellungen mit Hilfe einer gewöhnlichen Grafikhardware zu generieren, sind dreidimensionale Abbildungen von sehr hoher Auflösung in Echtzeit möglich, auch mit Videofrequenzen mit Bildlaufzeiten von typischerweise 1/25 Sekunden.

Selbstverständlich ist es durch Einsatz des erfindungsgemässen Verfahrens, bzw. durch Einsatz einer oder mehrerer, d.h. durch geeignete Kombination der zuvor geschilderten Ausführungsvarianten auch möglich, die bildliche Darstellung als stereoskopische Projektion zu erzeugen. Insbesondere bei solchen stereoskopischen Projektionen, wenn also dem menschlichen Visus durch Überlagerung von zwei in der Perspektive leicht verschobenen Projektionen durch eine geeignete Projektionseinrichtung ein dreidimensionales Bild vermittelt werden soll, ist die Einbeschreibung von Beleuchtungseffekten in die Projektion von besonderer Bedeutung. Da die verschiedenen Ausführungsvarianten des erfindungsgemässen Verfahrens eine enorm schnelle Verarbeitung der Bilddaten, d.h. insbesondere eine enorm schnelle und effiziente Auswertung der Beleuchtungsfunktionen im Messkoordinatensystem erlauben, sind selbst stereoskopische Projektionen,

eventuell unter Zuhilfenahme geeigneter Projektionsvorrichtungen, wie z.B. geeigneter 3D-Brillen, sogar von Bewegungsabläufen in Echtzeit und mit extrem hoher Auflösung möglich.

Somit eignet sich das Verfahren in seinen verschiedenen

- 5 Ausführungsvarianten insbesondere zur Verwendung für medizinische Zwecke, zum schnellen Generieren dreidimensionaler Darstellungen eines Körpers, insbesondere eines menschlichen Körpers oder Teilen davon, anhand von messtechnisch gewonnenen Daten.

- Es versteht sich, dass auch jede geeignete Kombination der zuvor
10 dargestellten Ausführungsvarianten vorteilhaft einsetzbar ist und darüber hinaus das Verfahren nicht nur für medizinische Zwecke, sondern ganz allgemein auch in der industriellen Technik, z.B. zur Untersuchung schwer zugänglicher Bereiche einer Anlage, hervorragend geeignet ist. Insbesondere müssen die Daten des zu visualisierenden Datensatzes nicht unbedingt durch
15 eine messtechnische Einrichtung, wie beispielsweise eine Ultraschallsonde generiert werden, sondern können beispielsweise auch durch eine mathematische Vorschrift, eine Simulation oder anders zur Verfügung gestellt werden.

- Bevor die Erfindung anhand der Zeichnung näher erläutert wird, sollen zum
20 besseren Verständnis des vorliegenden Anmeldetextes die für die Erfindung wesentlichen mathematischen Grundlagen zur Visualisierung eines räumlich aufgelösten, insbesondere eines nicht-kartesischen Datensatzes erläutert werden.

- Da bei einer Abbildung Ebenen des Originalvolumens, wegen der
25 Perspektive, nicht in Ebenen sondern in Kugelschalen im Projektionsraum abgebildet werden, ändern sich der Sehvektor und der Beleuchtungsvektor über einen projizierten Schnitt. Weil diese Änderung nicht linear, bestenfalls

näherungsweise von den Koordinaten der Textur abhängen, kann sie nicht als Texturoperation auf der Hardware codiert werden. Daher wird die Textur in kleinere Teilflächen zerlegt und zwischen den Eckpunkten der Teilflächen wird linear interpoliert. Die Eckpunkte dieser Teilflächen werden auch als Vertices bezeichnet. Eine solche Zerlegung in kleinere Teilflächen wird im Rahmen dieser Anmeldung als Tessellierung bezeichnet. Dabei findet die Tessellierung im Originalvolumen statt. Das Originalvolumen wird in konzentrische Kugelschalen geschnitten, so dass der Betrag des Betrachtungsvektor auf einer gegebenen Textur, die einer herausgeschnittenen Kugelschale entspricht, konstant bleibt, so dass der Betrachtungsvektor nicht entzerrt werden muss. Dadurch werden die üblicherweise auftretenden Auflösungsverluste durch die Entzerroperationen minimiert. Die Geometrie wird also im ursprünglichen Originalvolumen linearisiert, in dem erfindungsgemäss auch die Beleuchtungsfunktionen ausgewertet werden.

15

Der maximale Fehler, welcher durch eine Tessellierung mit Winkelinkrementen von kleinen Winkeln α bei einem Betrachtungsradius r entsteht ist

$$err = r \left(1 - \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \right) \approx r \frac{\alpha^2}{4} \quad (\text{eq. 1}). \text{ In Masseinheiten von Pixeln, ergibt sich so}$$

eine Obergrenze für das Inkrement bei einem Fehler von $err \leq \frac{1}{2}$ als: $\alpha \leq \sqrt{\frac{2}{r}}$,

20 für $r = 200$ also etwa 6 Grad. Dieser Fehler ist in kartesischen Volumina teilweise tolerierbar – in krummlinigen Koordinaten, wie beispielsweise in Systeme mit sphärischer oder zylindrischer Symmetrie, völlig unvertretbar gross.

25 Einen Ausweg bildet das sogenannte „Innere Shading“ gemäss der vorliegenden Erfindung, dessen mathematische Grundlagen im folgenden näher erläutert werden. Beim inneren Shading wird die Geometrie des Originalvolumens in ihren nicht-kartesischen Koordinaten linearisiert und die Vertices in die Geometrie des Projektionsraumes übersetzt. Die Betrachtungs-

und Beleuchtungsvektoren werden im Originalvolumen ausgewertet und die Beleuchtungsfunktionen werden so umgeformt, dass sie im Originalvolumen gelten. Somit findet das Shading vollständig im Originalvolumen statt, woraus sich die Bezeichnung „Inneres Shading“ herleitet.

5

Die Schritte Shaden und Rendern sind somit gemäss der vorliegenden Erfindung vollständig getrennt. Das Originalvolumen wird zuerst zumindest elementweise geshadet und dann über Texturschnitte gerendert. Wird das gesamte Originalvolumen zunächst vollständig geshadet und dann erst

10 gerendert, spricht man bei dieser speziellen Implementation auch von einem „zweistufigen Inneren Shading“.

Um das Verfahren zu implementieren, müssen die Tesselierung und die Form der Beleuchtungsfunktionen im Originalvolumen angegeben werden. Die drei
15 Koordinaten im Originalvolumen werden mit (α, β, γ) bezeichnet und jene des kartesischen Projektionsraumes als (x, y, z) . Die Transformation T zwischen den Systemen sei $(x, y, z) = T(\alpha, \beta, \gamma)$ - T ist i.a. kein linearer Operator, sein Inverses T^{-1} muss jedoch bis auf die Singularitäten existieren. Die entsprechenden linearen Operatoren werden wie folgt benannt:

20

$$x = T_x(\alpha, \beta, \gamma), \quad y = T_y(\alpha, \beta, \gamma) \quad \text{und} \quad z = T_z(\alpha, \beta, \gamma).$$

Im Falle von Kugelkoordinaten sind $(\alpha, \beta, \gamma) = (r, \phi, \varphi)$ und $x = r \cdot \cos(\varphi) \cos(\phi)$,
 $y = r \cdot \cos(\varphi) \sin(\phi)$ und $z = r \cdot \sin(\varphi)$, für Zylinderkoordinaten kann man

25 $(\alpha, \beta, \gamma) = (r, \phi, z)$ verwenden und erhält $x = r \cdot \cos(\phi)$, $y = r \cdot \sin(\phi)$ und $z = z$.

Es ist aus der Literatur bekannt, dass ein Gradient in einen Beleuchtungswert überführt werden kann, indem er als Zeiger in ein Datenfeld benutzt wird, welches auf den Seitenflächen des Einheitswürfels angeordnet ist. Die Werte
30 des Shadings werden also anhand der Vektoren der Betrachtung und der

Beleuchtung tabelliert und dann in einer Tabelle, Cubemap genannt, abgelegt. Das reduziert das Problem darauf zu zeigen, dass das Shading in Abhängigkeit des Gradienten im Ursprungsvolumen tabelliert werden kann.

- 5 Dies ist trivialerweise gegeben - beim Füllen der Cubemap entspricht der Gradientenvektor dem Vektor vom Ursprung an die zu berechnende Position in der Cubemap, dieser Vektor $n_{(0)}$ ist in G_0 gegeben, er kann also punktweise mittels T in den Projektionsraum überführt werden:

$$n_{(p)}(x_p) := \frac{dT}{dn_{(0)}}(x_0) \text{ (eq. 2).}$$

10

Dessen Beleuchtungsfunktion ist dann berechenbar.

Es gilt die Definition $x_p := T(x_0)$, wobei $\frac{dT}{dn}(x)$ die Richtungsableitung von T in der Richtung von n an der Stelle x ist. Da sowohl T als auch $\frac{dT}{dn}$ i.a. nicht-

- 15 linear sind muss die Cubemap nicht nur für jeden Knoten der Tessellierung neu berechnet werden, sondern sie kann auch zwischen den Punkten nicht korrekt interpoliert werden. Dieser allgemeine Ansatz ist also für krummlinige Koordinaten nicht gangbar.
- 20 Im folgenden soll gezeigt werden, dass die Shading Werte mittels den vier elementaren Rechenoperationen aus den Gradienten des Ursprungsvolumens gewonnen werden können. Dies ist wegen der Allgemeinheit der Transformation T nur als Näherung denkbar, die nachstehend angegeben wird.
- 25 Hierzu werden im Originalvolumen zwei Vertices \bar{x}_0 und \bar{x}_1 der Tessellierung, zwischen denen alle Funktionen linear interpoliert werden sollen, betrachtet. Die kartesischen Gradienten $\bar{g}_i := \nabla(T(V(\bar{x}_i)))$ für jedes i können per Hardware in Beleuchtungswerte umgerechnet werden. Es stehen jedoch nur die

Gradienten $\bar{g}_{oi} := \nabla(V(\bar{x}_i))$ zur Verfügung, die gemäss der Erfindung nicht durch eine Rotation überführt werden sollen.

- 5 Daher müssen zunächst die Normalen durch das Differenzial von T hergeleitet werden: eine Normalkomponente g in Richtung α an der Koordinate

$\bar{x}_0 = (\alpha, \beta, \gamma)$ wird dann im Projektionsraum durch $g \cdot \frac{\partial T}{\partial \alpha}(\bar{x}_0)$ ausgedrückt. Weil

die Richtungsvektoren lokal definiert und differenzierbar sind, können sie linear transformiert werden, und es kann die Übergangsmatrix

$G_o \rightarrow G_p$ (Ursprungsvolumen nach Projektionsraum) der Normalenvektoren im

- 10 Punkt \bar{x}_0 angeben werden: $N := \begin{pmatrix} \frac{\partial T_x}{\partial \alpha} & \frac{\partial T_x}{\partial \beta} & \frac{\partial T_x}{\partial \gamma} \\ \frac{\partial T_y}{\partial \alpha} & \frac{\partial T_y}{\partial \beta} & \frac{\partial T_y}{\partial \gamma} \\ \frac{\partial T_z}{\partial \alpha} & \frac{\partial T_z}{\partial \beta} & \frac{\partial T_z}{\partial \gamma} \end{pmatrix}$. Dies zeigt, dass das Shading

von nicht-kartesischen Datensätzen konventionell durchführbar ist, jedoch erst nach der Übersetzung in den Projektionsraum.

Daher werden die Betrachtungen im weiteren auf eine Abwandlung einer

- 15 Basis $e_G := \left(\frac{\partial T}{\partial \alpha}, \frac{\partial T}{\partial \beta}, \frac{\partial T}{\partial \gamma} \right)$ des Projektionsraumes beschränkt. In e_G hat N die

Form der Einheitsmatrix. Die zugehörige Basis $e_N := \begin{pmatrix} \frac{\partial T}{\partial \alpha} & \frac{\partial T}{\partial \beta} & \frac{\partial T}{\partial \gamma} \\ \left\| \frac{\partial T}{\partial \alpha} \right\| & \left\| \frac{\partial T}{\partial \beta} \right\| & \left\| \frac{\partial T}{\partial \gamma} \right\| \end{pmatrix}$ ist

orthonormal, wenn das Originalvolumen G_o lokal orthogonal ist – was bei zylindrischen und sphärischen Koordinatensystemen der Fall ist – und daher durch Drehung der Standardbasis des Projektionsvolumens G_p zu erzeugen.

- 20 N ist in e_N eine Diagonalmatrix mit den Elementen $\{q_\alpha, q_\beta, q_\gamma\}$ mit $q_\alpha := \left\| \frac{\partial T}{\partial \alpha} \right\|$,

$q_\beta := \left\| \frac{\partial T}{\partial \beta} \right\|$, $q_\gamma := \left\| \frac{\partial T}{\partial \gamma} \right\|$. Dies beweist, dass für lokal orthogonale Systeme der

Gradient in G_o einem kartesischen Gradienten entspricht, welcher durch N^{-1}

transformiert wurde. Und N^{-1} ist die Diagonalmatrix mit den Kehrwerten dieser q 's. Es kann also unmittelbar der Gradient in G_0 verwendet werden, nachdem er komponentenweise mit den Kehrwerten der q 's skaliert wurde. Damit ist bereits eine mögliche Implementation des Shadings in G_0 aufgezeigt.

5

Es sollen jedoch noch weitere Eigenschaften des Shadings ausgebeutet werden, so dass eine effizientere Implementierung angegeben werden kann, welche auch für nicht-orthogonale Systeme gilt, welche „windschiefe“ Basisvektoren besitzen. Solche Systeme können beispielsweise von

10 sogenannten Array Scannern erzeugt werden. Da im Stand der Technik nie die Gradienten selbst verwendet werden, sondern alle Beleuchtungswerte aus den Skalarprodukten (\bar{g}, \bar{l}) , (\bar{g}, \bar{v}) und (\bar{v}, \bar{l}) und einer optionalen Skalierung mit $\|\bar{g}\|$ erzeugt werden, ergeben sich hier Möglichkeiten zur Einsparung.

15 Hierzu müssen die Gleichungen lediglich im Originalvolumen in eine geeignete Form gebracht werden. Die einfache Forderung lautet dann $(\bar{g}_i, \bar{l}) = (\bar{g}_{oi}, \bar{l})$ (eq. 3) etc., also die Invarianz der Skalarprodukte. Diese Forderung ist trivialerweise erfüllbar, indem dasselbe Euklidische Skalarprodukt verwendet wird, welches basisunabhängig ist. Dies ist aber kein
20 gangbarer Weg, weil ein solches Skalarprodukt aufwendig zu berechnen ist. Das Kriterium für den Lösungsansatz ist einfach: g soll nicht transformiert werden, weil für jeden Pixel ein g anfällt, g und v werden jedoch nur in jedem Vertex ausgewertet. Es müssen also $(\bar{g}_i, \bar{l})_p = (\bar{g}_{oi}, S(\bar{l}))_o$ (eq. 4) zur Verfügung gestellt werden, mit einem basisabhängigen Standardskalarprodukt für das
25 Originalvolumen und den Projektionsraum.

Im weiteren wird $\bar{l}' := S(\bar{l})$ explizit hergeleitet.

Im betrachteten Punkt x im Ursprungsvolumen G_0 seien die Koordinaten der Vektoren durch die Basis $e := \{\bar{e}_\alpha, \bar{e}_\beta, \bar{e}_\gamma\}$ gegeben, also $\bar{g} := g_\alpha \bar{e}_\alpha + g_\beta \bar{e}_\beta + g_\gamma \bar{e}_\gamma$ und $\bar{l} := l_\alpha \bar{e}_\alpha + l_\beta \bar{e}_\beta + l_\gamma \bar{e}_\gamma$. Betrachtet man die Skalarprodukte der Basis $c_{ij} := (\bar{e}_i | \bar{e}_j)$, dann ist $c_{ii} = 1$, aber i.a. $c_{ij} \neq 0$ für die nicht-orthogonalen Basen.

- 5 Ausgeschrieben lauten die Skalarprodukte:

$$(\bar{g}, \bar{l}) = g_\alpha l_\alpha + g_\beta l_\beta + g_\gamma l_\gamma + g_\alpha l_\beta c_{\alpha\beta} + g_\alpha l_\gamma c_{\alpha\gamma} + g_\beta l_\alpha c_{\alpha\beta} + g_\beta l_\gamma c_{\beta\gamma} + g_\gamma l_\alpha c_{\alpha\gamma} + g_\gamma l_\beta c_{\beta\gamma} \quad (\text{eq. 5})$$

wobei bei orthonormaler Basis e nur die ersten drei Terme existierten.

10

Gruppiert man den Ausdruck in (eq. 5) nach den Komponenten von g :

$$(\bar{g}, \bar{l}) = g_\alpha (l_\alpha + l_\beta c_{\alpha\beta} + l_\gamma c_{\alpha\gamma}) + g_\beta (l_\beta + l_\alpha c_{\alpha\beta} + l_\gamma c_{\beta\gamma}) + g_\gamma (l_\gamma + l_\alpha c_{\alpha\gamma} + l_\beta c_{\beta\gamma}) \quad (\text{eq. 6}),$$

- 15 erkennt man (eq 6) als Standardskalarprodukt mit einem neuen Vektor l' mit den Komponenten

$$S(l) = (l_\alpha + l_\beta c_{\alpha\beta} + l_\gamma c_{\alpha\gamma}, l_\beta + l_\alpha c_{\alpha\beta} + l_\gamma c_{\beta\gamma}, l_\gamma + l_\alpha c_{\alpha\gamma} + l_\beta c_{\beta\gamma}) \quad (\text{eq. 7}).$$

- 20 Mit $S(l)$ steht also eine universale Transformationsvorschrift für die Vektoren l und v zur Verfügung. Diesen neuen l' und v' darf man keine wirkliche geometrische Bedeutung zuschreiben, ausser dass sie die Skalarprodukte im Originalvolumen G_0 invariant erhalten.

- 25 Damit steht eine sehr einfache Vorschrift von minimalem Rechenaufwand zur Verfügung, welche das Berechnen der Skalarprodukte im Originalvolumen G_0 auf dieselbe Art wie im karthesischen Projektionsraum erlaubt, ohne dass T hierzu ausgewertet werden müsste. Die „c“s sind ihrerseits Skalarprodukte der lokalen Basen, werden für die meisten Systeme - auch für nicht orthogonale -

jedoch globale Konstanten sein, und daher keinerlei Rechenaufwand konsumieren.

- l und v werden in \bar{x}_0 und \bar{x}_1 und dazwischen vom Grafikprozessor linear interpoliert, die „g“s hingegen werden in jedem Pixel berechnet und nicht nur in den Vertices. Der durch die Linearisierung eingeführte Fehler existiert beim kartesischen Rendern ebenfalls, da der Sehvektor über das Sehfeld schwenkt, das Schwenken aber als lineare Operation angenommen wird.
- 10 Dennoch ist der Fehler der Interpolation, der allgemeinen Abbildung T wegen, viel komplexer als im karthesischen Fall: der Beleuchtungsvektor l und der Betrachtervektor v sind beides Richtungsvektoren, welche durch Normierung in einem Punkt x erzeugt werden $v := \frac{x - x_v}{\|x - x_v\|}$ (eq. 8) mit x_v der Betrachterposition. Um die einfachst mögliche Form der Richtungsvektoren zu erhalten, verwenden wir (eq. 7).
- 15

- Somit herrschen in G_0 dieselben Bedingungen wie in karthesischen Systemen. Da (eq 3) in G_0 linear ist, kommt die Nichtlinearität einzig vom Nenner von (eq. 8). Für eine „hinreichend feine“ Tesselierung in dem Sinne, dass sich der Nenner von (eq. 8) monoton entwickelt, kann der Fehler der Linearisierung durch die Kehrwertfunktion abgeschätzt werden:
- 20

$$e(t) := Q \left[\left[t \cdot \frac{1}{d_0} + (1-t) \cdot \frac{1}{d_1} \right] - \left[\frac{1}{t \cdot d_0 + (1-t) \cdot d_1} \right] \right] \quad (\text{eq. 9}). \quad t \in [0..1] \text{ ist der}$$

- Interpolationsparameter und die „d“s stehen für die Nenner in den Vertices, und Q ist eine Skalierung, welche daher kommt, dass die durch (eq. 7) umgeformten Vektoren keine Einheitsvektoren mehr sind. Durch die Beschränkungen der „c“s in a3 gilt $Q \in]0..4[$. Da $e(t) = 0, t \in \{0,1\}$, kann das Fehlermaximum an den Extrema von e ausgewertet werden:
- 25

$$\frac{e(t)}{dt} = 0 \rightarrow \frac{1}{d_0} - \frac{1}{d_1} + \frac{d_0 - d_1}{(t \cdot d_0 + (1-t) \cdot d_1)^2} = 0 \text{ (eq. 10a), was für den nicht trivialen}$$

Fall, dass $d_0 \neq d_1$ (andernfalls ist der Fehler identisch 0) ausgewertet werden zu:

$$5 \quad (t(d_0 - d_1) + d_1)^2 = -\frac{d_0 - d_1}{\frac{1}{d_0} - \frac{1}{d_1}} = \frac{d_1 - d_0}{d_1 - d_0} d_0 d_1 = d_0 d_1 \text{ und damit}$$

$$t = \frac{\pm \sqrt{d_0 d_1} - d_1}{d_0 - d_1} \text{ (eq. 10b).}$$

Die Lösung ist eindeutig, da $t \in [0..1]$ und daher ein Pluszeichen vor der
10 Wurzel stehen muss.

Dies ergibt ein handliches Kriterium, die Feinheit der Tessellierung festzulegen.

15 Durch Rückeinsetzen von (eq. 10b) in (eq. 10a) erhält man:

$$e(t) := Q \left| \left(\frac{\sqrt{d_0 d_1} - d_1}{d_0 - d_1} \right) \cdot \left(\frac{1}{d_0} - \frac{1}{d_1} \right) + \frac{1}{d_1} - \frac{1}{\frac{\sqrt{d_0 d_1} - d_1}{d_0 - d_1} \cdot (d_0 - d_1) + d_1} \right|$$

$$= Q \left| \left(\frac{\sqrt{d_0 d_1} - d_1}{d_0 d_1} \right) + \frac{1}{d_1} - \frac{1}{\sqrt{d_0 d_1}} \right| = Q \left| \frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_0} \right| \text{ (eq. 11).}$$

20 Das ergibt das überraschende Resultat, dass ähnlich wie für (eq 1), Fehler < 1 erzwingbar ist. Wenn d_0 vorgegeben ist, so bestimmt (eq 11), in welchem Bereich d_1 gewählt werden kann.

Es ist sogar so, dass mit der Tessellierung verhältnismässig sorglos umgegangen werden kann, solange man sich im Originalvolumen G_0 bewegt, weil man dann keiner Singularität nahek kommt und die „d“s verhältnismässig gross bleiben. Für „d“s grösser als 1, ist die Methode durch den

5 Geometrischen Fehler von (eq 1) begrenzt und nicht durch die Fehler der Shading Näherung (eq 9).

Bisher wurde das folgende gezeigt: die für das allgemeine Shading und Rendering notwendigen Skalierungen und Transformationen sind mit

10 elementaren Rechenoperationen durchführbar. In den Vertices erhält man die korrekten Beleuchtungswerte, die interpolierten Werte enthalten höchstens Fehler zweiter Ordnung wie in (eq 9) beschrieben. Die Auswertung in den Vertices ist ebenfalls elementar, und die Vertices sind vom Standpunkt des Rechenaufwandes nicht sehr dicht (und müssen auch nicht sehr dicht sein);

15 ihre Auswertung ist folglich nicht der Flaschenhals der Berechnung.

Im folgenden wird nun die Erfindung anhand der schematischen Zeichnung näher erläutert. Es zeigen:

- 20 Fig. 1 Ein aus dem Stand der Technik bekanntes Verfahren zum Visualisieren eines Originalvolumens;
- Fig. 2 Erzeugung einer ebenen Textur gemäss dem Stand der Technik;
- Fig. 3 Linearisierung einer kugelschalenförmigen Textur;
- Fig. 4 ein Ausführungsbeispiel des erfindungsgemässen Verfahrens;
- 25 Fig. 5 Beispiele für Texturen in Zylinderkoordinaten;

Fig. 6 Ausführungsbeispiel für eine Linearisierung in krummlinigen Koordinaten.

Die Figuren 1 bis 3 zeigen den Stand der Technik und wurden bereits Eingangs eingehend diskutiert.

- 5 Fig. 4 zeigt schematisch die wichtigsten Schritte eines Ausführungsbeispiels des erfindungsgemässen Verfahrens. Anhand von Fig. 4 soll beispielhaft auf den für die Praxis wichtigen Fall Bezug genommen werden, dass ein Datensatz D auf Messwerten $D(\alpha, \beta, \gamma)$ beruht, die aus einer volumenaufgelösten Abtastung eines Körpers resultieren, und dass aus
- 10 diesem Datensatz D eine dreidimensionale Darstellung erzeugt wird. Mit "dreidimensionaler Darstellung" ist dabei gemeint, dass die Darstellung tatsächlich dreidimensional ist, oder dass beispielsweise durch eine geeignete Projektionsvorrichtung eine stereoskopische Projektion erzeugt wird, oder dass die Projektion eben, beispielsweise auf einem Computermonitor erfolgt,
- 15 aber ein dreidimensionaler Eindruck vermittelt wird, z.B. mittels Methoden der räumlichen oder perspektivischen Darstellung, insbesondere unter Verwendung eines entsprechenden Beleuchtungsmodells. Im speziellen können solche Darstellungen semi-transparent sein, so dass sie einen Einblick in den abgetasteten Körper gestatten.
- 20 Bei dem in Fig. 4 dargestellten Ausführungsbeispiel wird ein Originalvolumen G_0 , beispielsweise das Herz G_0 eines menschlichen Körpers, mit einer Messeinrichtung 1, im vorliegenden Beispiel mit einer Ultraschall-Messeinrichtung 1, abgetastet. Eine solche Ultraschall-Messeinrichtung 1 umfasst beispielsweise mehrere Ultraschallwandler 11, von denen mehrere
- 25 bezüglich einer Achse γ benachbart zueinander angeordnet sind. Während des Betriebs wird die Ultraschall-Messeinrichtung 1 um die Achse γ rotiert, wie dies der Doppelpfeil an der Achse γ der Ultraschall-Messeinrichtung 1 in Fig. 4 andeutet. Dabei werden die einzelnen Ultraschallwandler 11 im wesentlichen

parallel betrieben, so dass das Originalvolumen G_0 , also beispielsweise ein Herz, gleichzeitig in mehreren parallelen Schichten, die jeweils im wesentlichen senkrecht zur γ - Achse liegen, über einen Winkelbereich oder einen Sektor ($\beta_0 \times \gamma_0$) mit Ultraschall abgetastet wird. Die Information
5 bezüglich der dritten Dimension in Richtung α wird beispielsweise aus der Laufzeit der Ultraschallechos gewonnen.

Die so gewonnenen volumenaufgelösten Daten $D(\alpha, \beta, \gamma)$ liegen, gegebenenfalls nach einer signaltechnischen Vorverarbeitung, somit als ein räumlich aufgelöster Datensatz D vor, der die Informationen der
10 abzubildenden Struktur enthält. Dabei ist der Datensatz D durch sogenannte Texturen T_p aufgebaut, die Schnitte durch das Originalvolumen G_0 repräsentieren. Durch die Ultraschall-Messeinrichtung 1 selbst bzw. durch deren Arbeitsweise ist das Messkoordinatensystem K_m , in welchem die Daten $D(\alpha, \beta, \gamma)$ vorliegen, vorgegeben. Bei dem hier beschriebenen Beispiel handelt
15 es sich um Zylinderkoordinaten. Die Texturen T_p entsprechen dann, wie in Fig. 5 gezeigt, drei verschiedenen Flächentypen, also Textur-Typen T_α , T_β und T_γ , auf denen jeweils eine der Zylinderkoordinaten α , β , γ einen konstanten Wert hat. Dabei ist die Anwendung des erfindungsgemässen Verfahrens selbstverständlich keineswegs auf Zylinderkoordinaten
20 beschränkt, sondern auch auf andere krummlinige Koordinaten und selbstverständlich auch auf kartesische Koordinaten anwendbar und das zuvor gesagte gilt für andere als Zylinderkoordinaten völlig analog. Der durch die Ultraschall-Messeinrichtung 1 generierte Datensatz D wird in eine Datenverarbeitungsanlage 3 geladen und dort verarbeitet. Dabei wird,
25 eventuell nach einer mathematischen Aufbereitungsphase, zunächst das Beleuchtungsmodell, d.h. die diesem zugrunde liegenden Beleuchtungsfunktionen im Messkoordinatensystem K_m ausgewertet, d.h. es wird das oben definierte "Innere Shading" durchgeführt.

Danach werden die Daten dem ebenfalls oben definierten "Rendern" unterzogen und der Grafikhardware 4 zugeführt, mit deren Hilfe eine dreidimensionale Darstellung des zu projizierenden Bildes 5, beispielsweise auf einem Beobachtungsmonitor 2 erfolgt.

- 5 Fig. 5 zeigt schematisch die drei Textur-Typen, für den Fall, dass das Messkoordinatensystem K_m Zylindersymmetrie besitzt. Besitzt das Messkoordinatensystem K_m eine andere Symmetrie, beispielsweise Kugelsymmetrie, haben die Texturen T_α , T_β und T_γ bzw. die sie repräsentierenden Flächen selbstverständlich entsprechend der Symmetrie
10 des Koordinatensystems, eine andere Geometrie.

- Erfindungsgemäss wird nach dem Durchführen des Shadings, d.h. nach dem Auswerten des Beleuchtungsmodells BM im Messkoordinatensystem K_m , der Datensatz D, bzw. werden die Texturen T_p im Messkoordinatensystem K_m linearisiert, d.h. dem Vorgang des Renderns unterzogen. Dies soll beispielhaft
15 in Fig. 6 in einer schematischen Darstellung an einer Gruppe von T_α Texturen eines Datensatzes in einem zylindersymmetrischen Messkoordinatensystem K_m noch kurz erläutert werden.

- Wie bereits eingehend erläutert, wird der Sehvektor S (bzw. der Beleuchtungsvektor) weder auf ebenen Texturen T_p noch auf krummlinig
20 begrenzten Texturen T_p einen konstanten Betrag haben; vielmehr ist der Betrag dieser Vektoren, wie im linken Bild von Fig. 6 schematisch dargestellt, auf Kugelschalen K konstant. Somit ändert sich der Sehvektor S im allgemeinen über einen Schnitt, d.h. über eine Textur T_p .

- Weil somit betragsmässige Änderungen des Sehvektors S in der Regel nicht
25 linear von den Texturkoordinaten der Texturen T_p , abhängen, können diese auch nicht auf der Graphikhardware 4 unmittelbar kodiert werden. Daher werden die krummlinig begrenzten Texturen T_p , wie im mittleren Bild von

Fig. 6 dargestellt, linearisiert, so dass geradlinig begrenzte Teilflächen entstehen. Die Eckpunkte dieser Teilflächen können nun ohne eine Koordinatentransformation durchzuführen auf der Graphikhardware 4, wie im rechten Bild von Fig. 6 schematisch dargestellt, kodiert und beispielsweise auf einem Beobachtungsmonitor 2 als Bild 5 dargestellt werden.

Durch das erfindungsgemässe Verfahren ist es somit möglich, auf besonders elegante und effiziente Weise mehrdimensionale Datensätze, die in beliebigen krummlinigen Koordinaten, z.B. in Zylinder- oder Kugelsymmetrie vorliegen, ohne grossen Rechenaufwand und enorm schnell auf gewöhnlicher Graphikhardware unter Berücksichtigung eines entsprechenden Beleuchtungsmodells unmittelbar zu kodieren. Das wird dadurch erreicht, dass der Vorgang des sogenannten Shadings, das heisst der Auswertung der Beleuchtungsfunktionen und des Renderns, d.h. der Vorgang der Linearisierungsoperationen, vollständig getrennt sind: Die Beleuchtungsfunktionen werden im Originalvolumen, also im Messkoordinatensystem ausgewertet und dann erst linearisiert. Da die Auswertung der Datensätze mit elementaren Rechenoperationen möglich ist und das Shading ausschliesslich im Originalvolumen und nicht erst, wie aus dem Stand der Technik bekannt, im Projektionsraum stattfindet, ist das erfindungsgemässe Verfahren enorm schnell, so dass in Echtzeit die Visualisierung auch von sehr komplexen Datensätzen möglich wird. Selbst die Visualisierung bewegter Vorgänge in stereoskopischer Darstellung wird mit hoher Auflösung und mit Bildwiederholraten, die typischen Videofrequenzen entsprechen, möglich. Dadurch, dass die Beleuchtungsfunktionen im Originalvolumen und nicht im Projektionsraum ausgewertet werden, ist es mit dem erfindungsgemässen Verfahren aufgrund seiner beachtlichen Geschwindigkeit bei der Durchführung der Visualisierungsoperationen möglich, auch sehr komplexe Beleuchtungsmodelle zu verwenden, so dass hochaufgelöste und realistische Darstellungen von bisher nicht gekannter Qualität erreichbar sind.

Patentansprüche

P.7321/lr/uw

1. Verfahren zum Visualisieren eines räumlich aufgelösten Datensatzes (D) unter Verwendung eines Beleuchtungsmodells (BM), wobei ein Datum ($D(\alpha, \beta, \gamma)$) des Datensatzes (D) jeweils einem Volumenelement (V) zugeordnet ist, dessen Lage durch Koordinaten (α, β, γ) in einem Messkoordinatensystem (K_M) beschrieben wird, wobei die Daten ($D(\alpha, \beta, \gamma)$) als mindestens eine Textur ($T_{\alpha_i}, T_{\beta_j}, T_{\gamma_k}$) in eine Grafikhardware geladen werden, um in einem Projektionsraum eine bildliche Darstellung (5) zu erzeugen, dadurch gekennzeichnet, dass das Beleuchtungsmodell (BM) im Messkoordinatensystem (K_M) ausgewertet wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, bei welchem die Daten ($D(\alpha, \beta, \gamma)$) des Datensatzes (D) ohne Transformation aus dem Messkoordinatensystem (K_M) in ein anderes Koordinatensystem, insbesondere ohne Transformation in ein karthesisches und / oder isotropes Koordinatensystem, verarbeitet werden.
3. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, bei welchem das Messkoordinatensystem (K_M) ein nicht-kartesisches Messkoordinatensystem (K_M) ist.
4. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, bei welchem das Messkoordinatensystem (K_M) ein Zylinder- oder Kugelkoordinatensystem (K_M) ist.
5. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, bei welchem zwischen den Daten ($D(\alpha, \beta, \gamma)$) des Datensatzes (D) im Messkoordinatensystem (K_M) linear interpoliert wird.

6. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, bei welchem das Beleuchtungsmodell im Datensatz (D) nahe einer Singularität ausgewertet wird.
7. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, bei welchem die
5 Daten $(D(\alpha, \beta, \gamma))$ des Datensatzes (D) eine volumenaufgelöste Abtastung eines Körpers (G_0) repräsentieren, und bei welchem die bildliche Darstellung (5) eine dreidimensionale, insbesondere eine semi-transparente Darstellung (5) des Körpers (G_0) ist.
8. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, bei welchem die
10 bildliche Darstellung (5) als stereoskopische Projektion erzeugt wird.
9. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, bei welchem die Daten $D((\alpha, \beta, \gamma))$ des Datensatzes (D) mittels einer Ultraschall-Messeinrichtung (1) generiert werden.
10. Verwendung eines Verfahrens gemäß einem der vorangehenden
15 Ansprüche, insbesondere für medizinische Zwecke, zum schnellen Generieren dreidimensionaler Darstellungen (5) eines Körpers (G_0), insbesondere eines menschlichen Körpers oder Teilen davon, anhand von messtechnisch gewonnenen Daten $(D(\alpha, \beta, \gamma))$.

Zusammenfassung

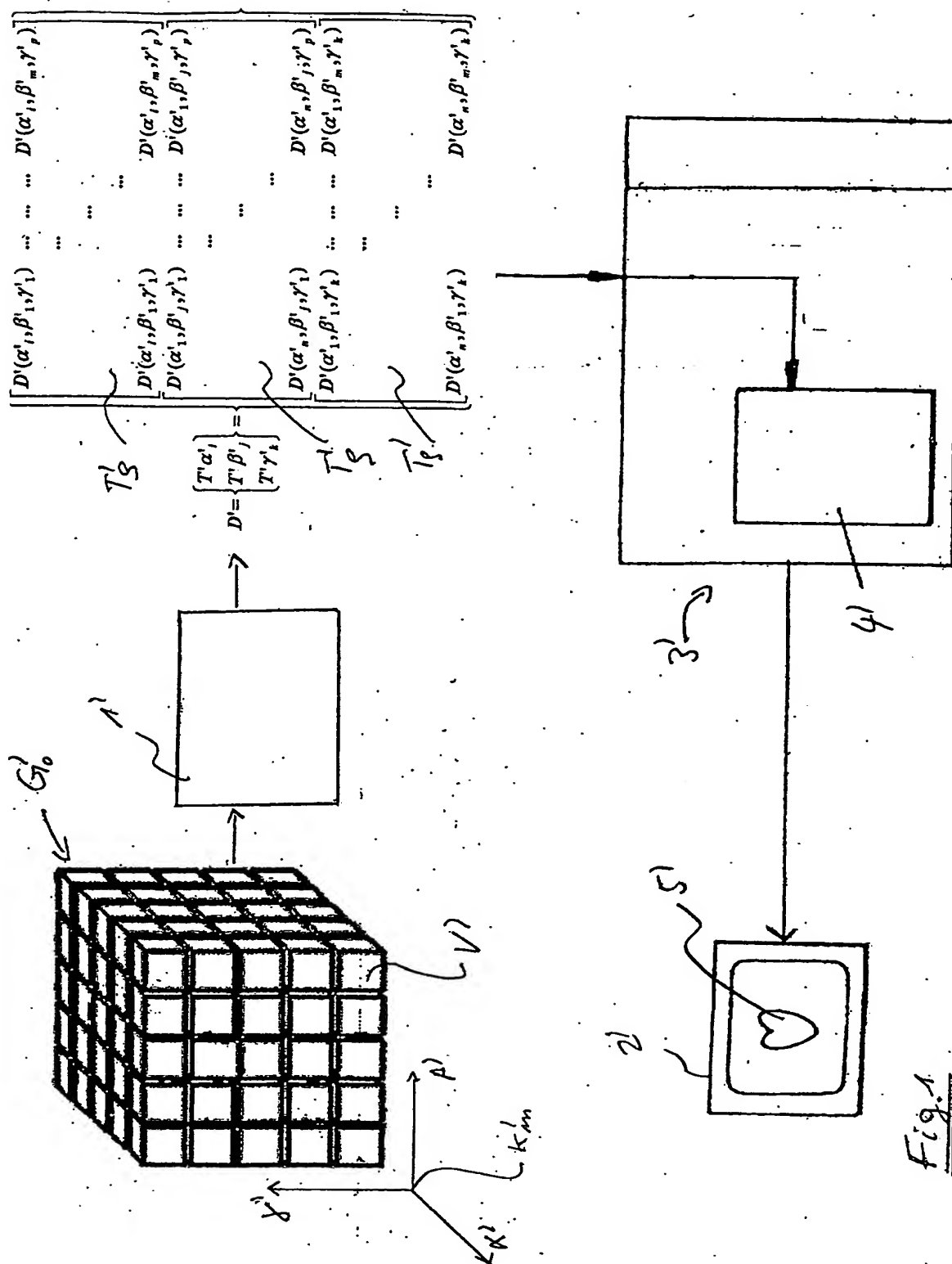
P.7321/lr/uw

Erfindungsgemäss wird ein Verfahren zum Visualisieren eines räumlich aufgelösten Datensatzes (D) unter Verwendung eines Beleuchtungsmodells (BM) vorgeschlagen, wobei ein Datum ($D(\alpha, \beta, \gamma)$) des Datensatzes (D) jeweils einem Volumenelement (V) zugeordnet ist, dessen Lage durch Koordinaten (α, β, γ) in einem Messkoordinatensystem (K_M) beschrieben wird. Die Daten ($D(\alpha, \beta, \gamma)$) werden als mindestens eine Textur ($T_{\alpha_i}, T_{\beta_j}, T_{\gamma_k}$) in eine Grafikhardware (4) geladen, um in einem Projektionsraum eine bildliche Darstellung (5) zu erzeugen. Dabei wird das Beleuchtungsmodell (BM) im Messkoordinatensystem (K_M) ausgewertet.

(Fig: 4)

15

Erfinder: MARGADANT, Felix, Dr.



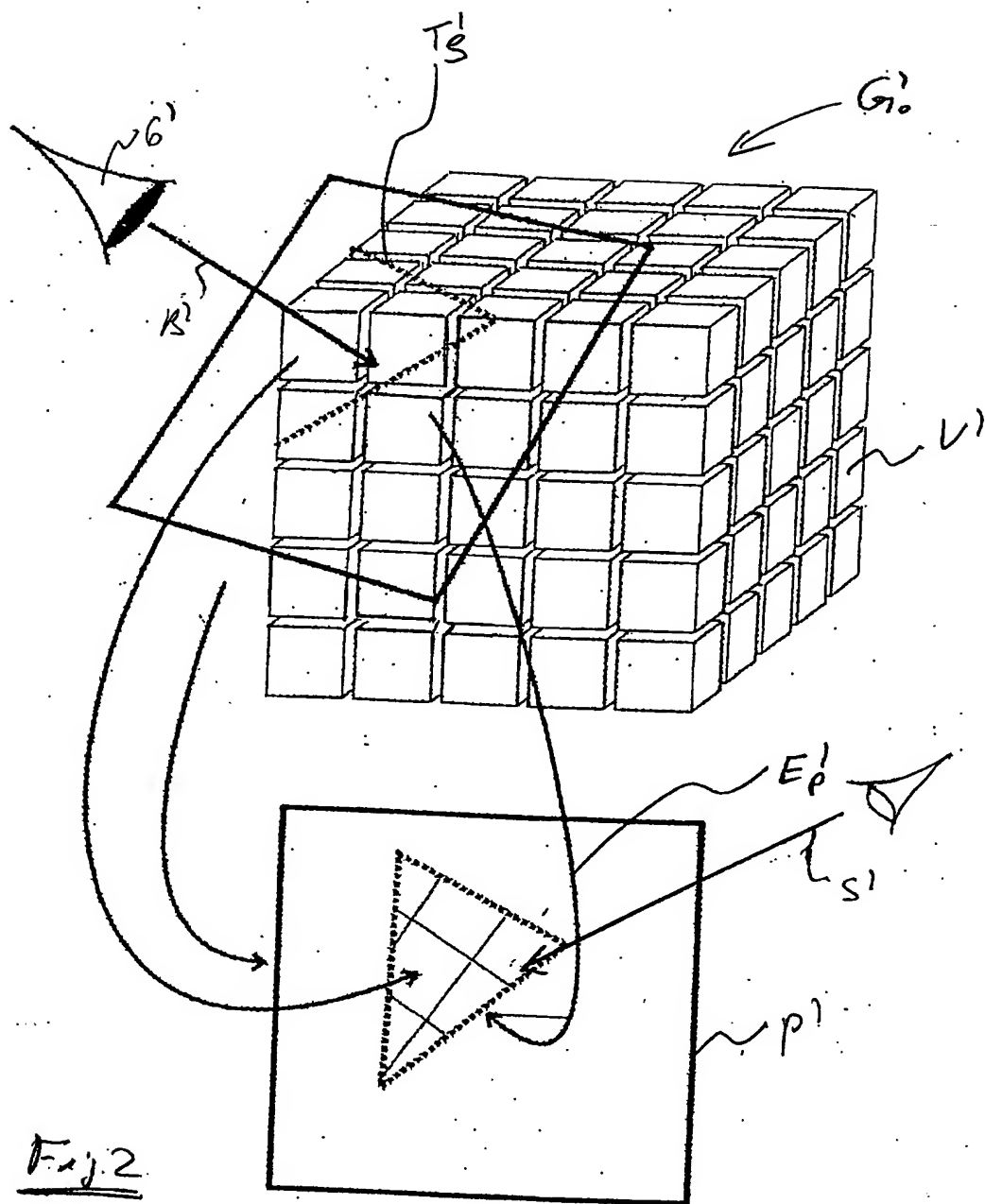


Fig. 2

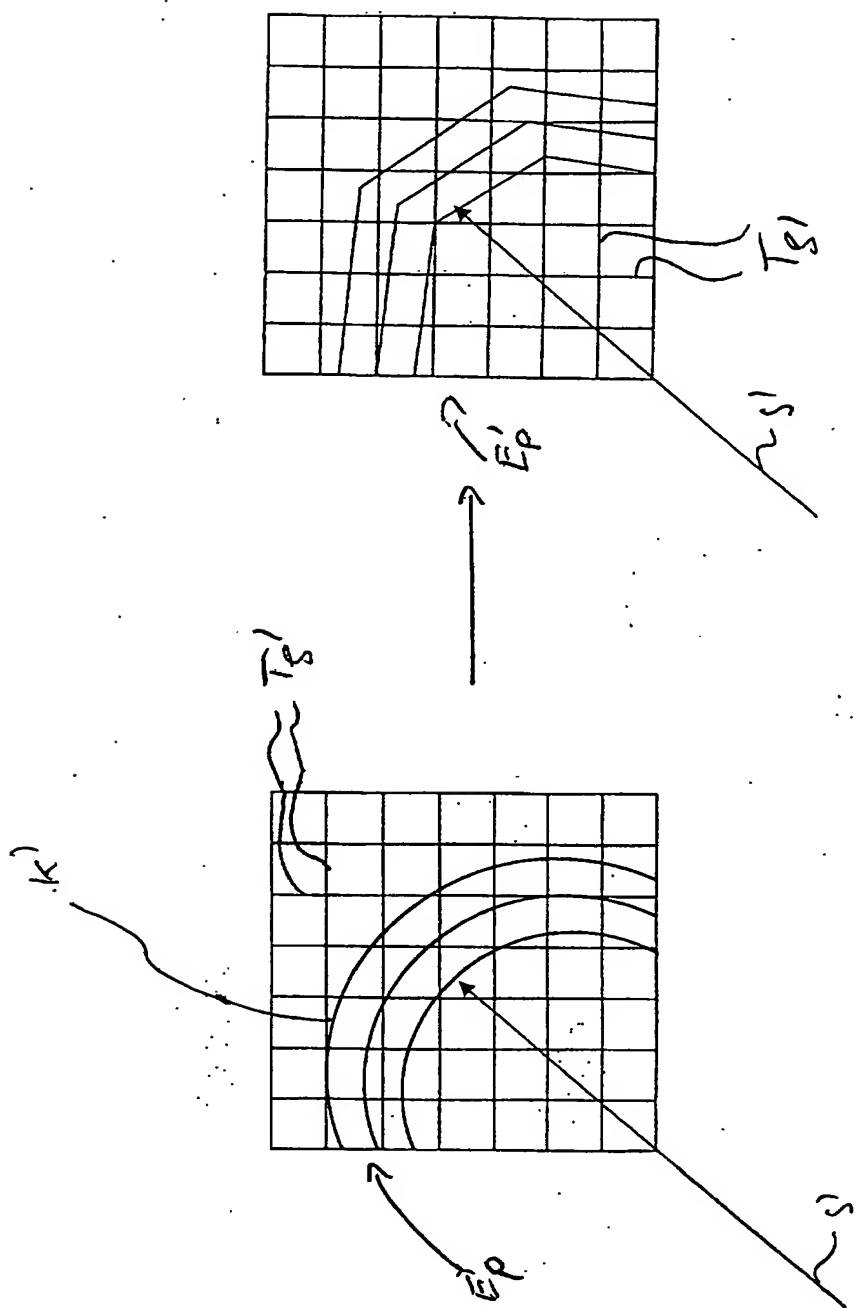


Fig. 3

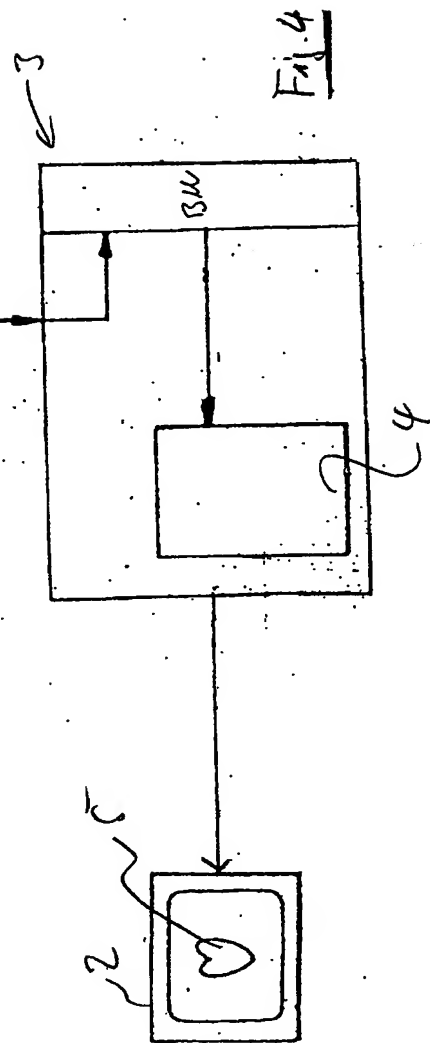
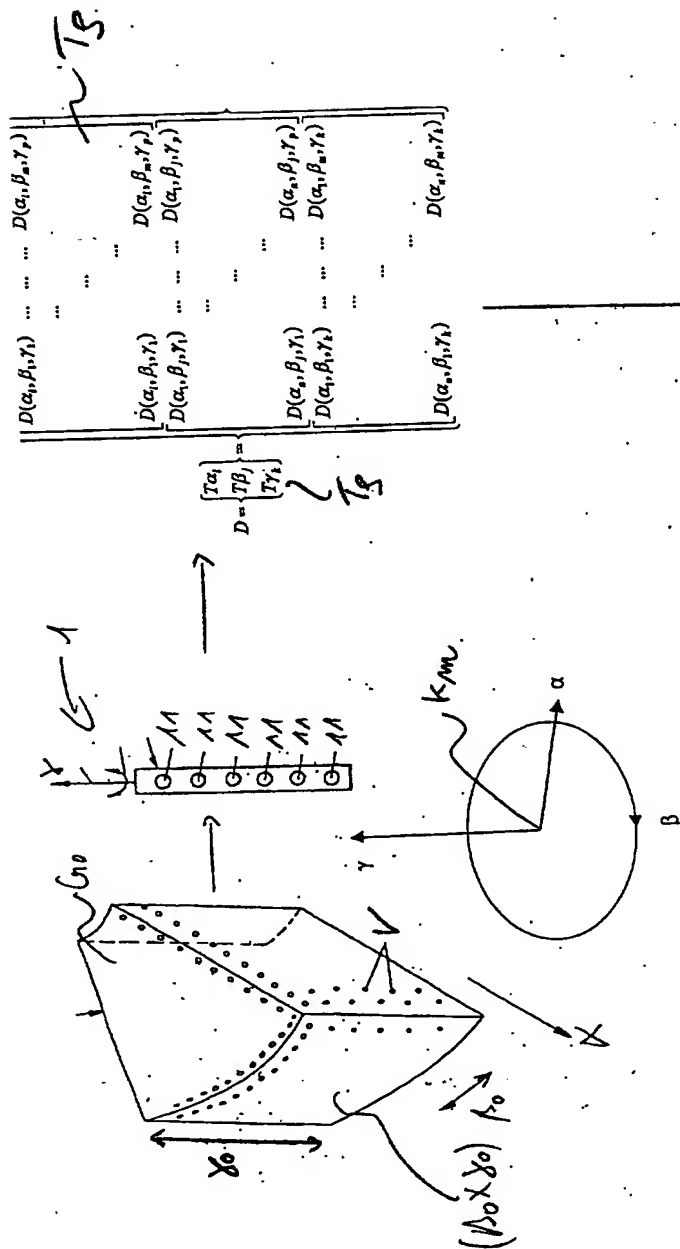


Fig. 4

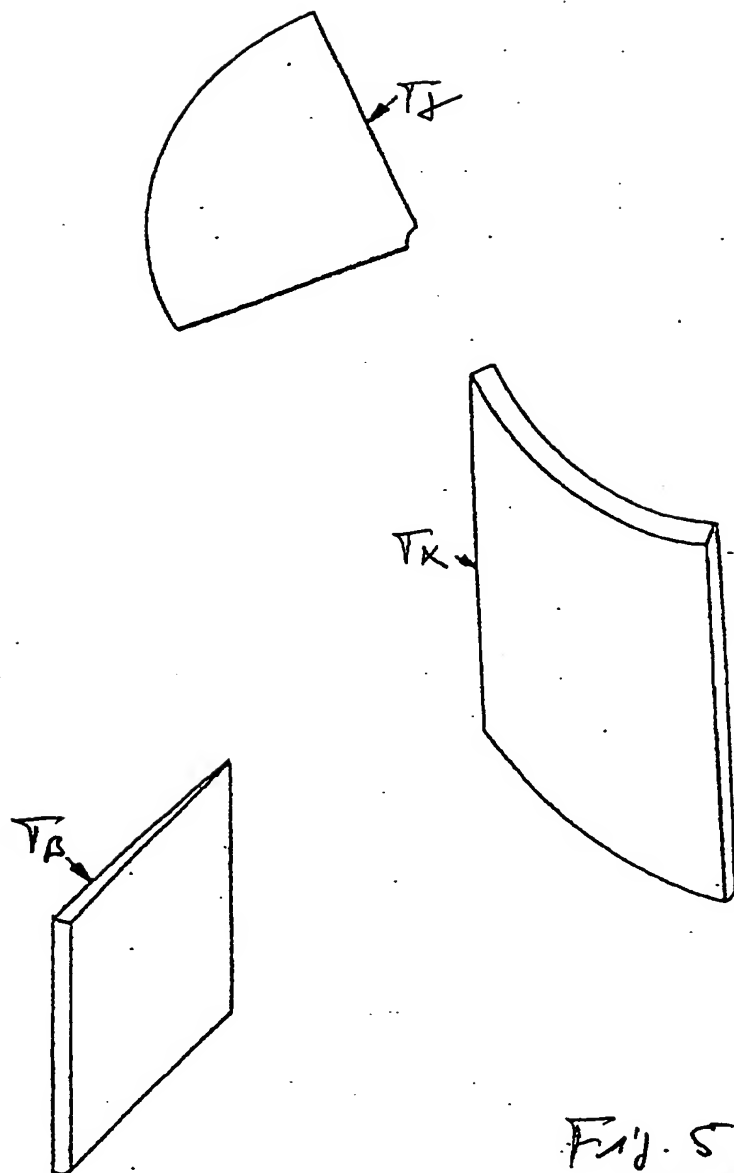


Fig. 5

Fig. 6

